

Luftaktivierung an klinischen Linearbeschleunigern

Der Großteil der strahlentherapeutischen Behandlungen wird mit hochenergetischer Röntgenstrahlung, die durch Elektronen-Linearbeschleuniger (Linacs) erzeugt wird, durchgeführt. Aufgrund der hohen Durchdringungsfähigkeit dieser harten Röntgenphotonen können auch tief liegende Tumore bei gleichzeitiger Schonung des Normalgewebes behandelt werden.

Der Strahlenschutz an solchen Strahlentherapie-Linearbeschleunigern ist jedoch anspruchsvoll und deren Bunker benötigen ausreichend dicke Abschirmwände. Dieser Artikel behandelt speziell die Aktivierung von Luft und bewertet ihre Relevanz im Vergleich zu den übrigen Expositionsquellen an derartigen Anlagen.

Wirkungsweise der Linearbeschleuniger

Die Energien der Linearbeschleuniger reichen typischerweise von 6 MV bis 18 MV, früher sogar bis 25 MV.

Die Energieangabe 6 MV ist dabei folgendermaßen zu verstehen:

Der Linearbeschleuniger beschleunigt Elektronen auf eine Energie von 6 MeV und diese erzeugen in einem Wolfram-Target Röntgen-Bremsstrahlung mit Energien bis hin zu dieser Grenzenergie. Das Röntgen-Photonenspektrum entspricht damit einer mit 6 Megavolt betriebenen Röntgenröhre. Höhere Photonenenergien erlauben eine bessere Schonung der Oberfläche und eignen sich insbesondere für die Bestrahlung von tief liegenden Tumoren.

Ab Energien von 7 bis 8 MeV können Photonen außer mit Hüllenelektronen auch mit Atomkernen wechselwirken. Bei derartigen Photo-Kernreaktionen, schematisch dargestellt in Abb. 1 (oben), wird ein hochenergetisches Photon von einem Atomkern absorbiert und regt dort eine kollektive Schwingung der Nucleonen gegeneinander, eine sogenannte Riesenresonanz, an. Dieser angeregte Kernzustand zerfällt nach kürzester Zeit wieder durch Emission von Nucleonen, häu-

fig Neutronen, und hinterlässt einen typischerweise radioaktiven Restkern. Das bedeutet, dass beim Betrieb von Linearbeschleunigern über 6 MV sekundäre Neutronen produziert sowie Komponenten des Linacs und ggf. auch die Luft im Bestrahlungsraum aktiviert werden können.

Der hochenergetische Teil des Röntgenspektrums überlappt mit den photonuklearen Wirkungsquerschnitten

von Wolfram und Sauerstoff, wie in Abb. 1 (unten) zu sehen ist. Schwere Materialien wie die Wolfram-Kollimatoren werden bereits bei Energien knapp über 6 MV aktiviert, wobei auch sekundäre Neutronen entstehen.

Für leichte Kerne wie Sauerstoff oder Stickstoff liegen die Schwellenergien für Photo-Kernreaktionen jedoch oberhalb von 15 MeV und die direkte Aktivierung von Luft ist daher praktisch nur für sehr hohe Photonenenergien wie 18 MV relevant. Jedoch kann auch der Einfang sekundärer Neutronen an ^{40}Ar -Kernen in der Luft zu einer indirekten Luftaktivierung führen (s. weiter unten).

Bei 6 MV ist das Strahlungsfeld quasi frei von sekundären Neutronen, zwischen 6 und 10 MV ist die Neutronenkontamination noch vernachlässigbar und über 10 MV wird die Neutronendosis relevant.

Neutronendosis relevant?

Strahlentherapeutische Behandlungen

Die Neutronenproduktion und die Aktivierung sind ein Mitgrund dafür, dass Strahlentherapie-Linacs in

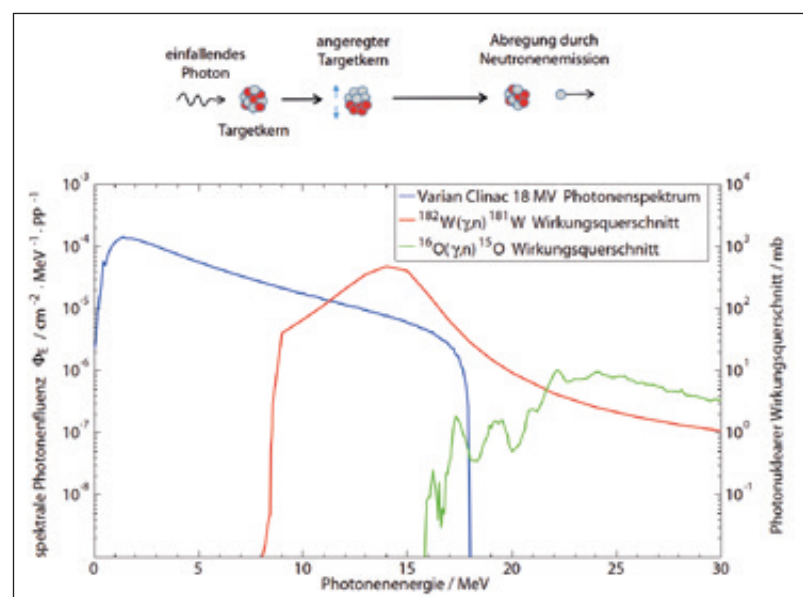


Abb. 1: Oben: Schematische Darstellung einer Photo-Kernreaktion
Unten: Photonuklearer Wirkungsquerschnitt von Wolfram und Sauerstoff im Vergleich zum Photonenspektrum eines Varian-Clinac-Beschleunigers im 18-MV-Modus

Deutschland in der Vergangenheit nach Strahlenschutzverordnung und nicht etwa nach Röntgenverordnung eingeordnet wurden, auch wenn diese im Grunde nichts weiter als große Röntgenanlagen sind.

Die meisten strahlentherapeutischen Behandlungen werden heutzutage als intensitäts- bzw. fluenzmodulierte Strahlentherapie (IMRT) durchgeführt. Diese Technik, bei welcher die Dosisverteilung im Patienten durch eine Kombination von vielen kleinen aus unterschiedlichen Winkeln applizierten Strahlungsfeldern per Computer optimiert wird (inverse Planung), wurde Anfang der neunziger Jahre eingeführt und hat die Strahlentherapie aufgrund der hohen Anpassungsfähigkeit der Dosisverteilung an die anatomischen Gegebenheiten im Körper des Patienten revolutioniert.

Aufgrund der oben beschriebenen Photo-Kernreaktionen bei hohen Photonenenergien und der damit einhergehenden Produktion sekundärer Neutronen, welche im Verdacht stehen, das

Risiko für späte Nebenwirkungen und sekundäre Tumorbildung zu begünstigen, werden die meisten IMRT-Behandlungen heutzutage bei niedrigen Energien zwischen 6 MV und 10 MV durchgeführt. Dennoch finden die hohen Photonenenergien 15 MV oder 18 MV noch regelmäßig Verwendung bei konventionell geplanten Bestrahlungen (also Nicht-IMRT-Bestrahlungen) im Bereich des Beckens oder bei Ganzkörperbestrahlungen vor Knochenmarktransplantationen sowie für Aufsättigungsfelder bei Mamma-Bestrahlungen.

Praktischer Strahlenschutz in Strahlentherapie-Kliniken

Die Thematik der Neutronenproduktion und Luftaktivierung bei 18 MV war Gegenstand einer Studie [1], für welche neben Neutronen-Ortsdosismessungen vor allem umfangreiche Monte-Carlo-Simulationen mit dem FLUKA-Code durchgeführt wurden.

Beim medizinisch-technischen Personal herrscht oft große Vorsicht vor der aktivierten Luft im Bestrahlungsraum. Beispielsweise wird häufig nach Ganzkörperbestrahlungen einige Mi-

nuten erwartet, bevor der Raum geöffnet wird, um Nuklidkonzentrationen in der Luft durch die Lüftung und die Abklingzeit zu reduzieren.

Diese Wartezeiten können für den Patienten allerdings sehr unangenehm sein und stören möglicherweise auch die Arbeitsabläufe in der Klinik. Die Ergebnisse der oben genannten Monte-Carlo-Studie sowie deren Implikationen für den praktischen Strahlenschutz in Strahlentherapie-Kliniken hinsichtlich der Strahlenexposition des medizinischen Personals werden im Folgenden kurz zusammengefasst und diskutiert.

Photo-Kernreaktionsdichte

Abbildung 2 (links) zeigt einen Schnitt durch den Kopf eines Varian-Clinac-Beschleunigers im 18-MV-Modus mit farblicher Darstellung der Photo-Kernreaktionsdichte.

Es ist klar zu erkennen, dass die meisten Photo-Kernreaktionen (rot und orange gefärbte Bereiche) im Primärkollimator, dem Flattening-Filter, sowie in den x- und y-Kollimatoren passieren. Das ist auch nachvollziehbar, da dies die Komponenten sind, welche den Großteil der im Target pro-

Risiko für späte Nebenwirkungen

den Produktion sekundärer Neutronen, welche im Verdacht stehen, das

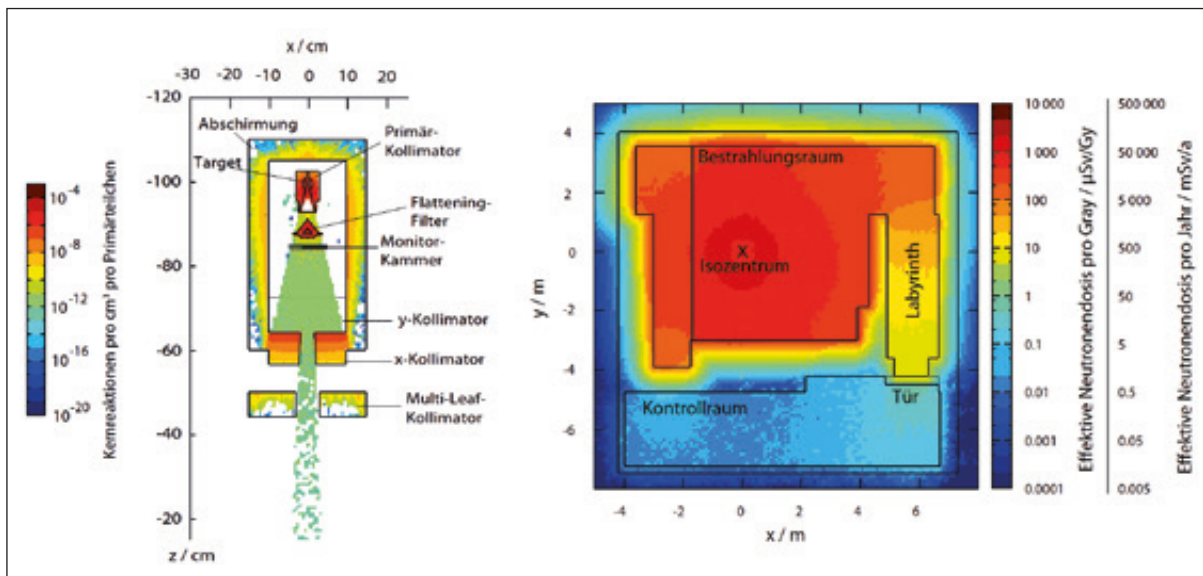


Abb. 2: Links: Vertikaler Schnitt durch den Bestrahlungskopf des Varian Clinac im 18-MV-Modus mit farblicher Darstellung der Photo-Kernreaktionsdichte
Rechts: Horizontaler Schnitt der Neutronen-Dosisverteilung im Bestrahlungsraum sowie dem angrenzenden Kontrollraum. Die Normierung der Dosis pro Gy gilt für eine Feldgröße von 10 x 10 cm². Für die Berechnung der Jahresdosis wurde eine Dosisleistung von 50.000 Gy pro Jahr angenommen.

duzierten Photonen absorbieren und damit das Therapie-Bestrahlungsfeld formen. Außerdem bestehen diese aus schweren Materialien, hauptsächlich Wolfram, welche hohe photonukleare Wirkungsquerschnitte aufweisen (siehe Abb. 1). Es ist außerdem zu erkennen, dass auch Photo-Kernreaktionen in der Luft stattfinden (grün gefärbter Bereich). Diese passieren genau in

Lokal aktivierte Luft

dem von den Kollimatoren definierten primären Photonen-Strahlbündel. Es ist allerdings zu erwarten, dass sich die lokal aktivierte Luft praktisch sofort durch

Diffusion und Konvektion mit der umliegenden Raumluft vermischt.

Neutronen-Dosisverteilung

Abbildung 2 (rechts) zeigt einen horizontalen Schnitt der Neutronen-Dosisverteilung (effektive Dosis, geschätzt aus den Neutronenspektren mittels Fluenz-zu-Dosis-Konversionsfaktoren) im Bestrahlungsraum sowie im angrenzenden Kontrollraum (Geometrie der Bunker am Uniklinikum Gießen). Die Farbpalette ist mit 2 unterschiedlichen Skalen versehen:

Die linke Skala zeigt die **effektive Neutronendosis pro Gy** im Maximum der Tiefendosiskurve bei einer Feldgröße von $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Bei einer Strahlentherapie-Sitzung wird ein Tumor in der Regel mit 2 Gy bestrahlt und dies wird üblicherweise an 20 bis 37 Tagen in Folge wiederholt.

Die rechte Skala zeigt die **effektive Dosis pro Jahr**, unter der Annahme, dass an einem Linearbeschleuniger typischerweise 50.000 Gy pro Jahr abgestrahlt werden (circa 50 Patienten pro Tag plus Qualitätssicherungs-Messungen).

Neutronendosis effektiv abgeschwächt

Es ist zu erkennen, dass die Neutronendosis durch die Abschirmwände sowie das Labyrinth effektiv abgeschwächt wird. Die Neutronendosis innerhalb des Bunkers ist

zweifelloso relativ hoch (einige mSv pro Gy), aber auch außerhalb ist diese nicht zu vernachlässigen (bis hin zu einigen mSv/a).

In der Vergangenheit wurden Linac-Kontrollräume als Überwachungsgebiete ausgelegt (Dosis < 6 mSv/a), während diese bei neu gebauten Bunkern nach der Richtlinie „Strahlenschutz in der Medizin“ von 2011 als normales Betriebsgelände (< 1mSv/a) geplant werden sollen. Die hohen geschätzten Beiträge der Neutronen zur Jahresdosis, in Abbildung 2 dargestellt, müssen allerdings etwas relativiert werden, da heutzutage, wie oben bereits angesprochen, nur noch ein geringer Bruchteil der Strahlentherapie-Behandlungen bei hohen Photonenenergien durchgeführt wird.

3 relevante Luftaktivierungsprodukte

Abb. 3 zeigt die Ausbeute der 3 relevanten Luftaktivierungsprodukte ^{13}N , ^{15}O und ^{41}Ar , gemittelt über das gesamte Volumen des Bestrahlungsraums (190 m^3) pro Gy.

Die Ausbeute der direkt durch Photo-Kernreaktionen erzeugten Luftaktivierungsprodukte ^{13}N und ^{15}O nimmt mit der Feldgröße zu, da das durchstrahlte Luftvolumen zunimmt (s. Abb. 1). Die ^{41}Ar -Produktion durch Neutroneneinfang-Reaktionen an ^{40}Ar ist unabhängig von der Feldgröße, da das sekun-

däre Neutronenfeld nur wenig von der Kollimator-Einstellung beeinflusst wird. Interessanterweise ist die ^{41}Ar -Ausbeute zumindest bei kleinen Feldgrößen ähnlich hoch wie die Ausbeute von ^{13}N , obwohl Argon nur 1 %, Stickstoff aber 78 % der Luft ausmacht.

**Argon 1%,
Stickstoff
78% der Luft**

Aus diesen Ausbeuten kann nun mittels eines dynamischen Modells eine effektive Dosis geschätzt werden, wobei noch zwischen **Inhalationsdosis** (innere Exposition durch Einatmen von radioaktiver Luft) und **Submersionsdosis** (äußere Exposition durch die radioaktive Umgebungsluft) unterschieden werden muss.

Strahlenexposition durch Submersion

Die Strahlenexposition durch Submersion ist in Abb. 4 für 1-MeV-Gamma-Strahlung illustriert. Die in [1] abgeschätzte Dosis durch Gamma-Submersion liegt im Bereich von $10,7 \mu\text{Sv/a}$. Wenn realistischere Annahmen für die Schätzung der Dosis eingesetzt werden (Daten aus Abb. 3, 4 für 4,5 m Halbkugelradius, 1.000 Stunden Aufenthaltsdauer), ergibt sich eine Dosis durch Gamma-Submersion von nur $0,6 \mu\text{Sv/a}$. Zusätzlich zur Gamma-

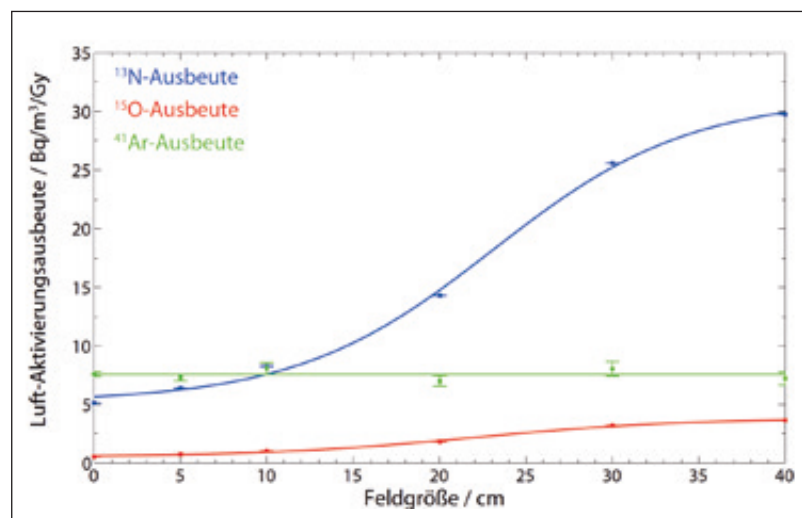


Abb. 3: Ausbeute der 3 relevanten Aktivierungsprodukte in der Luft im Bestrahlungsraum als Funktion der Feldgröße beim Betrieb eines 18-MV-Linacs

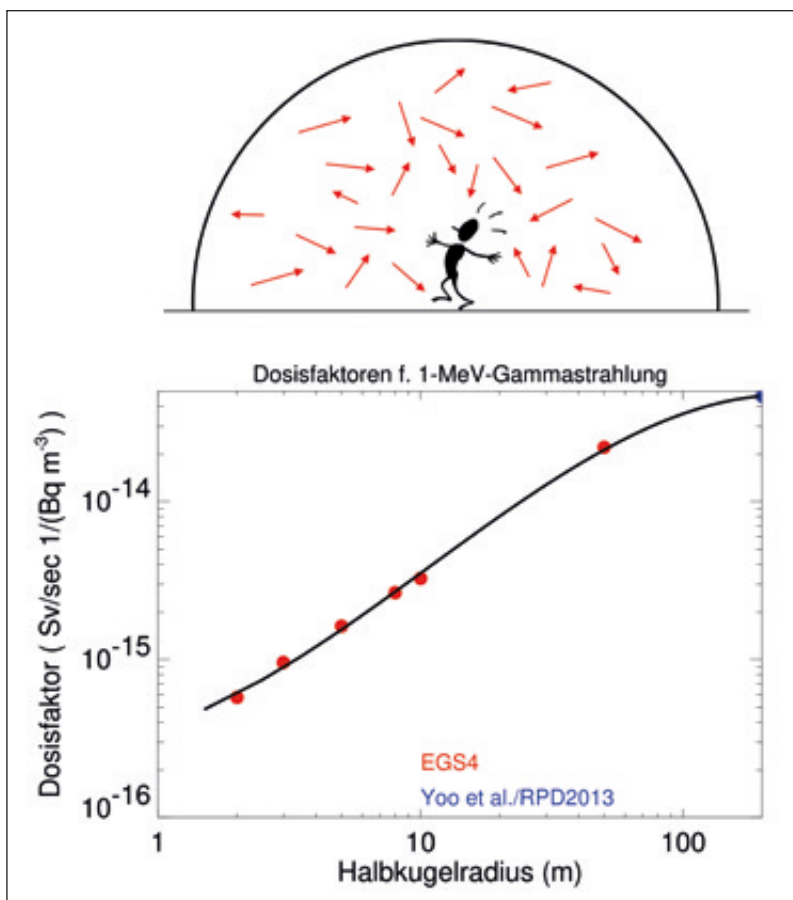


Abb. 4: Strahlenexposition durch aktivierte Luft (Submersion) sowie zugehörige Konversionsfaktoren für 1-MeV-Gamma-Strahlung in Abhängigkeit der Raum-Dimension

Submersion ist auch entsprechend die Beta-Submersion zu berücksichtigen. Für die Dosissschätzung müssen Annahmen

- zur Luftwechselrate (typischerweise 8-fach pro Stunde),
- der Aufenthaltsdauer (konservative Annahme für medizinisches Personal: 2.000 Stunden Aufenthaltszeit pro Jahr) sowie
- des Atem-Volumens (0,02 m³/min) getroffen werden. Außerdem müssen die Halbwertszeiten der Nuklide (¹³N:

10 min, ¹⁵O: 2 min, ⁴⁰Ar: 110 min) berücksichtigt und nuklidspezifische Konversionsfaktoren aus der Literatur (z. B. [2]) entnommen werden.

Die Berechnung der effektiven Dosis durch aktivierte Luft ist im Detail in Referenz [1] beschrieben. Selbst unter den konservativsten Annahmen (volle 2.000 Stunden Arbeitszeit in mit Aktivierungsprodukten gesättigter Luft, 40 x 40 cm² Feldgröße) liegt die geschätzte effektive Dosis für medizinisches Personal durch aktivierte Luft

im Linac-Bunker (Inhalation plus Submersion) unter 0,8 mSv/a.

Unter realistischeren Annahmen liegt die Jahresdosis sogar unter 0,1 mSv/a und ist damit praktisch vernachlässigbar.

Die Emission von radioaktiven Gasen in die Umwelt durch die Raumlüftung liegt 3 Größenordnungen unter den gesetzlichen Grenzwerten (20 kBq/m³ für ¹³N, 10 kBq/m³ für ¹⁵O und 2 kBq/m³ für ⁴¹Ar) und ist damit ebenfalls vernachlässigbar. Die Raumlüftung hat den größten Effekt auf die Konzentration von ⁴¹Ar, da dies die längste Halbwertszeit der genannten Nuklide hat.

Geschätzte Dosis für medizinisches Personal < 0,8 mSv/a

Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Luftaktivierung beim Betrieb von 18-MV-Linacs zur Strahlenexposition des medizinischen Personals beitragen kann, aber kein überaus großes Strahlenschutz-Problem darstellt.

Die Neutronendosis im Kontrollraum kann jedoch je nach Bunker-Design ein durchaus relevantes Problem darstellen. Außerdem sollten die aktivierten Blenden und schweren Materialien im Linac-Kopf, die hier nicht näher behandelt wurden, mit Vorsicht behandelt werden.

Georg Fehrenbacher, Felix Horst, Klemens Zink □

Haftungsausschluss

Die Inhalte dieser Zeitschrift werden von Verlag, Herausgeber und Autoren nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und zusammengestellt. Eine rechtliche Gewähr für die Richtigkeit der einzelnen Angaben kann jedoch nicht übernommen werden. Gleiches gilt auch für die Webseiten, auf die verwiesen wird. Es wird betont, dass wir keinerlei Einfluss auf die Inhalte und Formulierungen dieser Seiten haben und auch keine Verantwortung für sie übernehmen. Grundsätzlich gelten die Wortlaute der Gesetzestexte und Richtlinien sowie die einschlägige Rechtsprechung.